

文章编号 1004-924X(2015)增-0259-07

跨尺度微小零件自动精密装配系统

阮 冶¹, 任同群^{1,2}, 王晓东^{1,2*}, 王立鼎^{1,2}

- (1. 大连理工大学 辽宁省微纳米技术及系统重点实验室, 辽宁 大连 116024;
2. 大连理工大学 精密与特种加工教育部重点实验室, 辽宁 大连 116024)

摘要:研制了一种自动精密装配系统以解决跨尺度尺寸结构的零件精密装配问题。基于对装配任务的分析,系统采用了模块化体系结构,包括计算机控制及人机交互模块、3-DOF(自由度)作业机械臂模块、1-DOF 作业工作台模块、4-DOF 视觉测量与螺纹副装配模块、1-DOF 零件上料模块以及作业工具库模块等 6 部分。根据跨尺度零件特点与装配精度要求,该系统的视觉测量模块采用基于 Look and Move 模式的控制策略;针对视觉检测盲点的问题,机械臂模块基于力/位混合控制策略;螺纹副装配模块采用扭矩/时间的控制方法来实现螺纹装配预紧力的一致性。对某微小型器件进行了装配试验。结果表明:装配后的零件同轴度误差小于 13 μm ;平行度误差小于 10 μm ,满足微小型器件装配的同轴度和平行度要求。

关键词:微机电系统;跨尺度微小零件;精密装配;机器视觉

中图分类号:TP272;TP242.3 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20152313.0259

Automatic precision assembly system for trans-scale miniature parts

RUAN Ye¹, REN Tong-qun^{1,2}, WANG Xiao-dong^{1,2*}, WANG Li-ding^{1,2}

- (1. Key Laboratory for Micro/Nano Technology and System of Liaoning Province, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;
 2. Key Laboratory for Precision and Non-traditional Machining Technology of the Ministry of Education, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)
- * Corresponding author, E-mail: xdwang@dlut.edu.cn

Abstract: An automated precision assembly system for the part with a trans-scale structure is developed in the paper. Based on the analysis of assembly task, the system uses a modular architecture, including computer control and human-machine interaction module, 3-DOF (Degree of Freedom) operation manipulator module, 1-DOF operation workstation module, 4-DOF visual measurement and screw assembly module, 1-DOF charging module and operation tool library module. According to the characteristics of the trans-scale part and assembly accuracy, the visual measurement module of this system is based on the Look and Move mode control strategy. To solve the problem of blind spot detection, the manipulator module is based on impedance control strategy to control the force of part assembly and the screw assembly module adopts the torque / time control method to realize the consistency of the pre-tightening force of the screw assembly. The results of assembly experiment for a min-

收稿日期:2015-04-05;修订日期:2015-05-20.

基金项目:国家科技重大专项资助项目(No. 2013ZX04001-091)

ature device show that the error of the coaxial degree is less than $13 \mu\text{m}$ and the parallelism degree is less than $10 \mu\text{m}$. The assembly accuracy meets assembly requirements of miniature devices.

Key words: Micro-electro-mechanism System (MEMS); trans-scale miniature part; precision assembly; machine vision

1 引言

伴随集成电路(Integrated Circuit, IC)工艺及微细加工技术的迅速发展,微机电系统(Micro-Electro-Mechanism System, MEMS)的功能日益多样并趋于集成化, MEMS 器件的制造通常涉及多种加工工艺和制作材料,依靠传统的单体加工工艺很难实现^[1],因此加工的 MEMS 器件往往由多个零件组装而成。目前传统的人工作业方式已经不能满足器件装配精度和一致性的要求,需要精密装配系统把结构和功能相对简单的微小零件组装成复杂的微机电器件^[2-3]。

微小零件的尺度特征分为外形特征尺寸和关键特征尺寸,根据零件尺度特征的不同,微装配对象也可以分为两类:一类是具有微/中间尺度外形尺寸的零件(此类零件关键特征尺寸只可能更小),另一类是具有中间/宏尺度外形尺寸及微尺度关键特征尺寸的跨尺度零件^[4-5]。目前,微装配研究大多数集中于对微/中间尺度外形尺寸零件的装配,如北京理工大学研制的实现微小器件间隙配合关系的高精度装配实验平台^[6],华中科技大学研制的微装配机器人系统可以将直径为 $300 \mu\text{m}$ 的中空玻璃小球与直径为 $600 \mu\text{m}$ 的圆柱型金属腔对接装配^[7]。跨尺度微小零件装配则多以微对准操作的形式应用于平板类零件的装配,如微流控芯片封装等^[7-8]。跨尺度零件装配的难点在于解决宏-微尺度的矛盾,其中涉及对不同尺寸和材料制成零件的位姿检测、拾取、搬运及放置等操作。跨尺度零件装配的难点对精密装配系统的集成度、装配控制策略和装配流程规划的合理性都提出了更高要求。

本文围绕系统功能模块设计思想,设计了一套针对跨尺度平板类零件及微构件的自动精密装配系统。在此基础上,对装配控制策略及流程优化等微装配问题开展了研究,并进行了装配试验。

2 装配任务分析

某微小器件一共由 7 个零件组成,分为平板类微小零件和微构件两类,各零件外形结构如图 1 所示。

零件 1 中心为阶梯轴,直径依次为 $1.4, 2$ 和 4.4 mm ,其内底面有一字形刻线,长度约 20 mm ,宽度为 0.2 mm 。零件 1 作为装配基体,分别以轴心以及一字刻线为后续待装配零件提供叠装的位姿基准。零件 2 为圆形平板类零件,零件上镀有金属,装配以其中心孔和金属镀层边缘为特征,待零件 2 装配完成后,零件 1 的 4.4 mm 阶梯轴和刻线完全被遮挡。零件 3 有 2 个特征尺寸为 $120 \mu\text{m}$ 的挠性轴,两轴间距约为 13 mm ,其装配以两轴连线及其中点为定位基准,且零件 3 带有配重,导致零件重心不在其几何中心上,增加了拾取后保证水平姿态的难度,当零件 3 装配完成后,不能再改变装配基体的位姿以免已装配零件发生窜动。零件 4 为圆形平板类零件,装配时以特征尺寸为直径 3.5 mm 的中心孔进行定位。零件 5 为微构件,为前序装配零件进行预紧,其特征为直

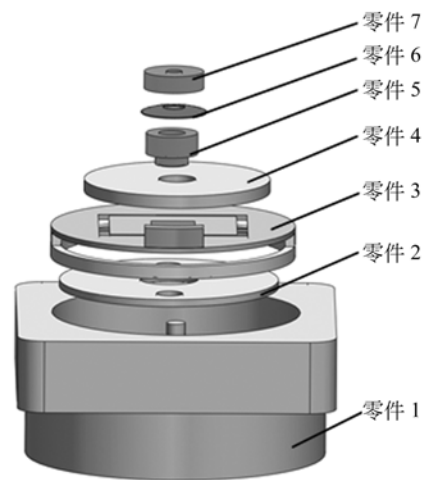


图 1 零件示意图

Fig. 1 Sketch map of parts

径 2.0 mm 的中心孔。零件 6 为碟形弹性微构件,其特征中心孔尺寸为直径 1.6 mm。零件 7 为小型 M1.4 螺母,用于前序装配各零件的紧固。

要完成以上多种零件的装配作业,需要针对操作对象设计不同的微夹持器,实现对零件的拾取、搬运以及放置,同时要实现紧固件的螺纹副装配。此外,针对零件 3 装配完成后,依然要对零件 4 调整位姿的情况,需要设计一套零件姿态调整装置对装配后序的零件姿态进行修正。

3 装配系统设计

采用先整体后局部的设计思想,建立了一套基于机器视觉的跨尺度零件自动精密装配系统。系统采用模块化体系结构,包括计算机控制及人机交互模块、作业工具库模块、3-DOF 作业机械臂模块、1-DOF 作业工作台模块、4-DOF 视觉测量与螺纹副装配模块及 1-DOF 零件上料模块等,装配系统如图 2 所示。

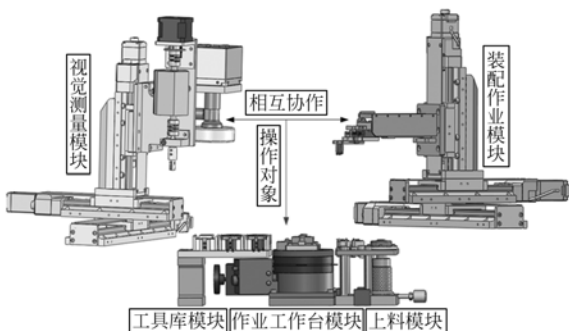


图 2 微小器件装配系统

Fig. 2 Miniature device assembly system

根据待装配微小零件的具体结构设计多种工具头,以适应不同零件的拾取和装配作业,所有微夹持器放置于工具库的底座上,组成了作业工具库模块,如图 3 所示。针对薄板类微小零件不易拾取和夹持过程中易因应力集中而发生变形的问題,设计了两头和三头两种吸附式微夹持器,以真空发生器产生的负压气体作为动力源。吸附式微夹持器上的每个吸附头均安装了小型吸附垫,以实现薄板类微小零件的平稳吸附。根据零件 5 和零件 6 两种微构件的结构设计了两种拾取式微夹持器,微夹持的拾取夹指能与零件的边缘结构贴合,实现微构件的拾取。每种微夹持器前端均设计有 U 形结构便于装配作业时机器视觉的定位

与检测。作业工具库模块的设计提高了零件装配效率及装配系统的适用性。

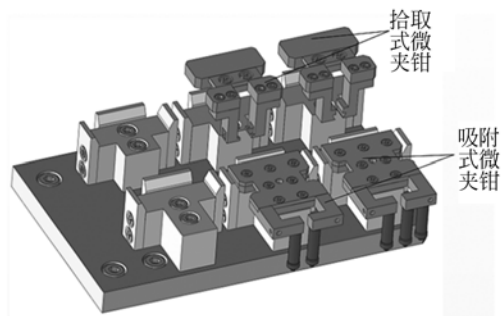


图 3 作业工具库模块

Fig. 3 Module of operation tool library

作业机械臂模块由气路组件、夹持组件和力传感检测装置等构成。气路组件为气动夹钳输送正压气源作为动力,并为吸附式微夹持器提供负压吸附气体。力传感检测装置安装在作业机械臂模块的 Z 轴导轨上,夹持组件通过布置成柔性四边形结构的弹簧片与模块夹持组件连接,弹簧片柔性四边形结构减小了装配力对零件的损坏以保护零件结构。机械臂通过 3 自由度导轨运动到作业工具库上方,控制夹持组件中气动夹钳的开合以达到夹持和换接工具库中的微夹持器的目的,换接过程如图 4 所示。在机械臂进行零件 Z 轴方向装配时,力传感检测装置实时监测零件间的

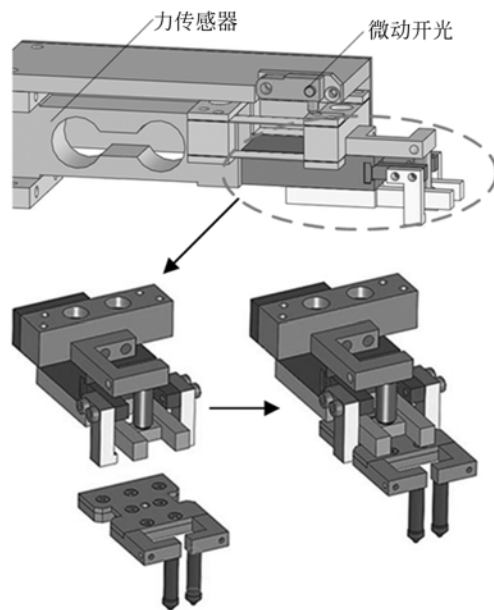


图 4 工具换接过程

Fig. 4 Replacement process of tool

装配力以保护易碎零件。

视觉测量与螺纹副装配模块由视觉检测装置和螺纹副装配及扭矩检测装置等构成。视觉检测装置通过 3 自由度导轨运动到目标零件的上方，对具有微、中尺度特征的零件进行定位检测，计算机根据获得的位姿信息控制机械臂和螺纹副装配装置拾取、搬运和装配多种零件，并控制作业工作台及零件上料模块分别对装配前序和后序的零件姿态进行调整。螺纹副装配及扭矩检测装置的螺母夹持组件通过柔性的联轴器和步进电机连接，实现共同转动达到传递扭矩的目的，精密扭矩传感器监测装配过程中紧固件的装配扭矩变化以确保螺纹副装配预紧力的一致性。

作业工作台模块安装在整个装配系统的中心，由精密转台和零件 1 固定装置组成，所有零件的装配均在工作台上实现。由于零件 1 固定装置的制造和安装误差，作业工作台的旋转中心与零件 1 的特征中心不一致，需要在零件装配的过程中多次对装配基体中心进行测量，以确保后序零件组装的准确度。

零件上料模块包括多种同微小零件结构特点相适应的固定装置和零件姿态调整装置。零件姿态调整装置是针对在零件 3 装配完成后装配基体位姿不变的情况设计的，该装置中的减速步进电机由强力磁铁和零件 4 固定装置连接，通过电机的脉冲运动实现零件 4 姿态调整，以满足装配的平行度要求。

3 微装配控制策略及流程

制定合理装配控制策略和流程对于微装配系

统至关重要，其可以提高系统的装配精度、零件装配效率和组成器件的性能，控制系统原理如图 5 所示。

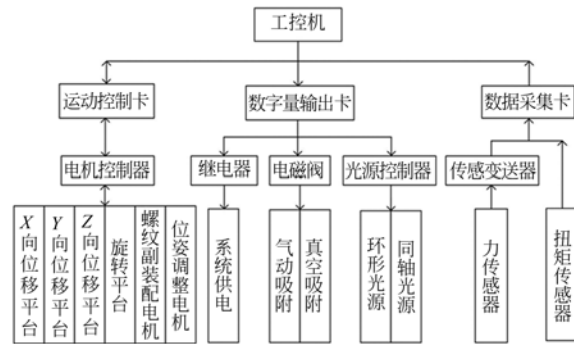


图 5 控制系统原理图

Fig. 5 Diagram of control system

3.1 Look and Move 视觉控制

结合精密装配系统的机械精度、相机分辨率等，系统采用基于机器视觉的 Look and Move 模式^[9]，将目标零件位姿信息转换至作业机械臂的空间坐标系中，驱动机械臂运动至目标位置，同时作业工作台和零件上料装置分别对装配基体和特定零件的姿态进行调整，以满足装配精度的要求。

视觉检测模块对零件特征识别的过程分为：图像预处理、图像分析和图像理解 3 个阶段。以零件 3 为例，相机运动到上料位置对零件 3 的特征采集图像，原始图像如图 6(a) 所示。计算机将采集到的图像进行图像增强、去噪等预处理，然后进行图像提取，将定位特征提取出来。根据最大类间方差法 (OSTU 法) 获得图像阈值分割的最佳阈值把图像分成前景和背景。再采用基于图像轮廓特征和全局、局部扫描取点的组合方式获得零件的局部边缘点信息，零件边缘图像如图 6(b)

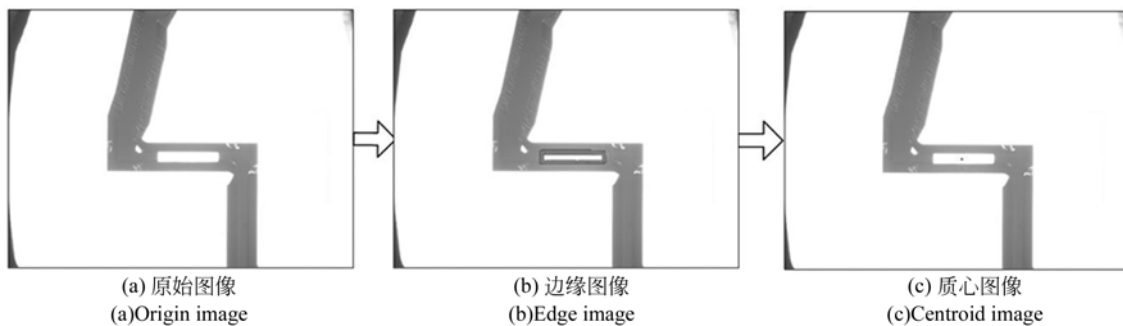


图 6 零件 3 筋图像

Fig. 6 Rib image of part 3

所示,再通过获得的零件边缘图像计算矩形的质心,零件 3 筋质心图像如图 6(c)所示,最后两个筋的质心连线即为零件 3 的装配特征直线。将零件 3 位姿信息和装配基体的基准信息进行坐标系统一,计算零件 3 特征直线和装配基准直线的夹角,驱动精密旋转电机完成两零件平行度调整。同理,测量并对齐零件 3 中心和装配基体中心,完成零件装配。

3.2 零件装配力的控制

力传感装置选用应变式传感器作为敏感元件,具有线性度好,易于更换^[10]等优点。装配力

的控制采用力/位混合控制策略,当机械臂末端与待装配零件接触时,分别进行位置控制和接触力控制以达到柔顺装配的目的。以零件 3 的装配为例,定位完成后,机械臂开始高速向下运动。当零件 3 即将接触装配基体时,机械臂的运动转换为低速,力传感器开始采集力觉信息,并与事先设定的阈值进行比较。微力觉测量技术应用到装配作业过程中,解决了视觉遮挡的情况下视觉检测盲点的问题,为装配系统提供必要的 Z 向维度装配信息,提高了装配精度并保护易碎零件的结构。零件 3 的装配流程如图 7 所示。

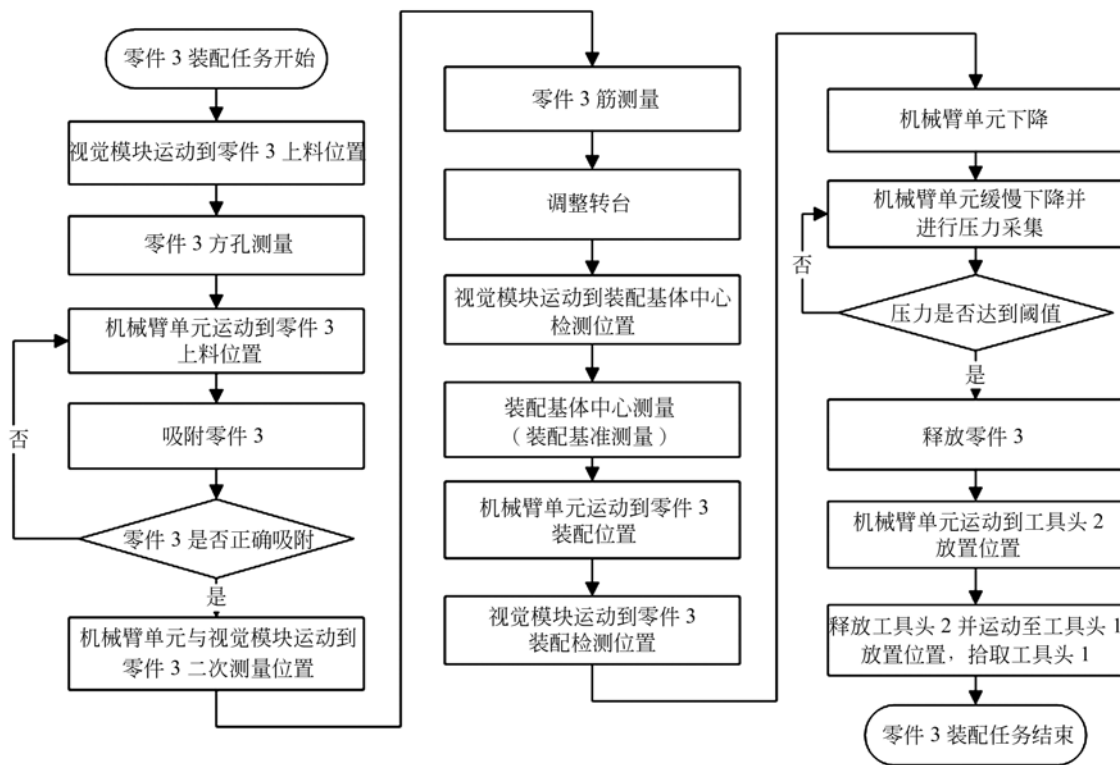


图 7 零件 3 装配流程图
Fig. 7 Assembly flow chart of parts 3

3.3 螺纹副微构件的装配控制

控制螺纹联接的实质就是控制螺纹联接的预紧力,以确保联接的紧密性。采用扭矩/时间的控制方法,通过监测扭矩-时间关系曲线,当扭矩传感器输送到计算机中的扭矩值发生明显变化时,螺母接触支撑面并贴紧,此时开始计时。当扭矩随时间变化的斜率 K_t 不变时,螺母完全贴紧,记

录 K_t 值。根据已知的 K_t 值、零件 6 弹性元件的刚度、螺纹副的几何尺寸特征、装配预紧力要求和步进电机的转动速度,计算得到螺纹副装配的扭矩阈值^[11]。在对螺纹副进行作业的过程中,当实测扭矩值达到设定的扭矩阈值时,停止步进电机的运动,实现螺纹副微构件的装配要求。零件 7 的装配流程如图 8 所示。

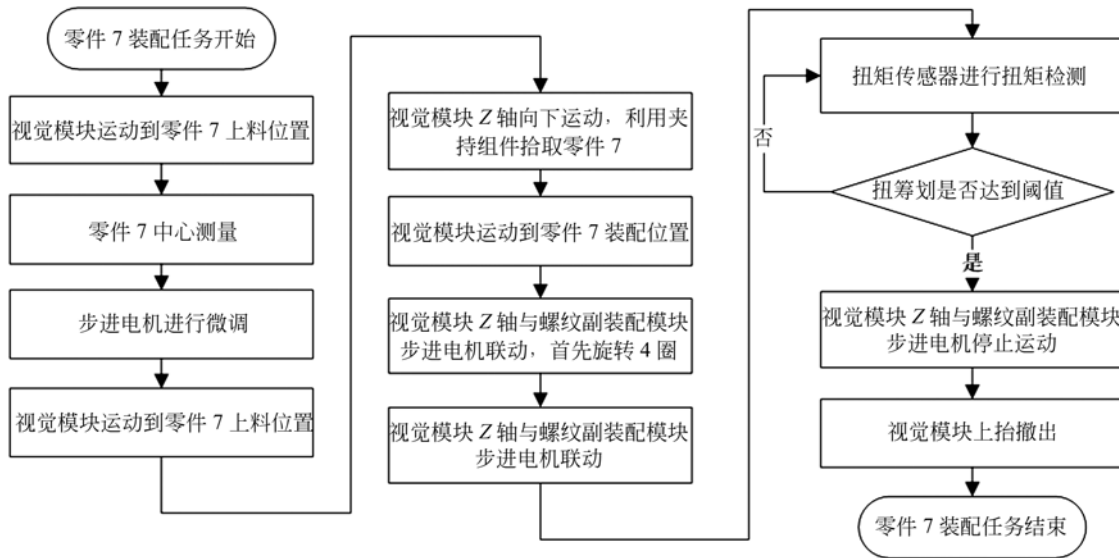


图 8 零件 7 装配流程

Fig. 8 Assembly flow char of parts 7

4 装配试验

自动精密装配系统样机如图 9 所示。使用该系系统样机对随机抽取的 5 组零件进行装配,并利用装配程序中的装配检测功能对装配精度进行检测,试验数据如表 1 所示。装配后的零件同轴度误差小于 $13\ \mu\text{m}$;平行度误差小于 $10\ \mu\text{m}$,满足某微小型器件的装配精度要求。

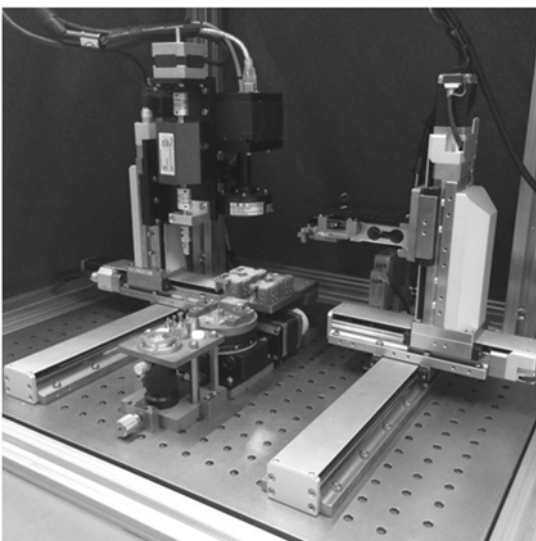


图 9 装配系统样机

Fig. 9 Prototype of assembly system

表 1 装配试验检测结果

Tab. 1 Testing result of assembly (μm)

零件组号	零件 1、2 平行度	零件 1、3 平行度	零件 1、4 平行度	零件 1、3 同轴度	零件 1、4 同轴度
1	4.2	2.7	7.5	12.8	7.9
2	6.3	7.7	4.0	11.9	10.0
3	3.5	4.2	5.3	12.4	12.4
4	9.1	3.4	8.7	12.2	8.8
5	8.4	8.6	9.8	11.4	11.3

5 结 论

本文针对跨尺度尺寸结构的零件精密装配,研制了一套精密装配系统。根据模块化设计思想,系统包括计算机控制及人机交互模块、3-DOF 作业机械臂模块、1-DOF 作业工作台模块、4-DOF 视觉测量与螺纹副装配模块、1-DOF 零件上料模块以及作业工具库模块等。该系统的视觉测量模块采用基于 Look and Move 模式的控制策略,驱动机械臂、工作台等模块运动;针对视觉检测盲点的问题,机械臂模块基于力/位混合控制策略对零件装配力进行控制;螺纹副装配模块采用扭矩/时间的控制方法实现了螺纹装配预紧力的一致性。

本研究使用所研制的装配系统进行了装配实验。对某微小型器件装配试验结果表明:装配后的零件同轴度误差小于 $13\ \mu\text{m}$;平行度误差小于 $10\ \mu\text{m}$,满足某微小型器件装配的同轴度和平行度要求。

参考文献:

- [1] 李庆祥,李玉和. 微装配与微操作技术[M]. 北京:清华大学出版社,2004.
LI Q X, LI Y H. *Micro Assembly and Micro Operation Technique*[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004. (in Chinese)
- [2] 沈飞,徐德,唐永建,等. 微操作/微装配中微力觉的测量与控制技术研究现状综述[J]. 自动化学报, 2014,40(5):785-797.
SHEN F, XU D, TANG Y J, *et al.*. Review of measuring and control technology of microforce in micromanipulation and microassembly[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2014,40(5):785-797. (in Chinese)
- [3] 谢晖,孙立宁,荣伟彬,等. 一种 MEMS 自动微装配机器人[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2006, 38(7): 1013-1016.
XIE H, SUN L N, RONG W B, *et al.*. Automatic microassembly robot for MEMS[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2006, 38(7): 1013-1016. (in Chinese)
- [4] 张习文,王晓东,罗怡,等. 跨尺度微小型零件的测量与装配[J]. 纳米技术与精密工程, 2012, 10(4): 342-347.
ZHANG X W, WANG X D, LUO Y, *et al.*. Measurement and Assembly of Trans-Scale Miniature Parts [J]. *Nanotechnology and Precision Engineering*, 2012, 10(4): 342-347. (in Chinese)
- [5] 宗光华,孙明磊,毕树生,等. 宏—微操作结合的自动微装配系统[J]. 中国机械工程, 2005, 16(23): 2125-2130.
ZONG G H, SUN M L, BI SH S, *et al.*. A microassembly workcell with macro to micro automatic operations [J]. *China Mechanical Engineering*, 2005, 16(23): 2125-2130. (in Chinese)
- [6] 唐永龙. 微器件高精度装配精确对准关键技术研究[D]. 北京:北京理工大学, 2014.
TANG Y L. *Research on Key Technology of Accuracy Alignment for Micro Devices High Precision Assembly*[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology. (in Chinese)
- [7] 唐永龙,张之敬,张晓峰,等. 微装配正交精确对准系统的设计[J]. 光学精密工程, 2012, 20(7): 1542-1550.
TANG Y L, ZHANG ZH J, ZHANG X F, *et al.*. Design of precise alignment orthogonal system used in micro-assembly [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(7): 1542-1550. (in Chinese)
- [8] 徐征,王德佳,刘云亮,等. 适用于微纳流控芯片对准连接的微装配系统[J]. 微纳电子技术, 2011, 48(3): 194-198.
XU Z, WANG D J, LIU Y L, *et al.*. Micro-Assembly System for the Alignment of Micro-Nanofluidic Chips[J]. *Micronanoelectronic Technology*, 2011, 48(3): 194-198. (in Chinese)
- [9] 徐征,王晓东,程新宇,等. 基于机器视觉的微装配控制策略及软件架构[J]. 光学精密工程, 2009, 17(4): 819-824.
XU Z, WANG X D, CHENG X Y, *et al.*. Control tactics and software architectures for micro-assembly based on machine vision [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(4): 819-824. (in Chinese)
- [10] 叶鑫,张之敬,孙媛,等. 集成微力检测与反馈的双晶片微夹持器[J]. 兵工学报, 2009, 30(9): 1242-1247.
YE X, ZHANG Z J, SUN Y, *et al.*. A bimorph piezoelectric ceramic microgripper integrating micro-force detecting and feedback[J]. *Acta Armamentarii*, 2009, 30(9): 1242-1247. (in Chinese)
- [11] 宋莎. 微小型零件精密装配中的螺纹副联接技术研究[D]. 大连理工大学, 2009.
SONG SH. *Research on screw joint for precise assembly of miniature parts*[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2009. (in Chinese)

作者简介:



阮 冶(1990—),男,辽宁大连人,博士研究生,2013 年于中南大学获得学士学位,主要从事微装配与微装配技术的研究。E-mail: laughsest@mail.dlut.edu.cn



王晓东(1967—),男,黑龙江哈尔滨人,教授,博士生导师,1989 年于南京航空学院获得学士学位,1992 年于哈尔滨船舶工程学院获硕士学位,1995 年于哈尔滨工业大学获博士学位,主要从事微装配技术与系统、精密仪器设计与制造等方面的研究。E-mail: xdwang@dlut.edu.cn